

38. Narayanasamy R., Senthilkumar V., Pandey K.S. Some features on hot forging of powder metallurgy sintered high strength 4% titanium carbide composite steel preforms under different stress state conditions // Materials & Design. -2008. –Vol.29, No.7. –P. 1380-1400.

40. Маслюк В.А., Напара-Волгина С.Г., Орлова Л.Н. и др. Горячештампованные износостойкие порошковые материалы на основе нержавеющей сталей аустенитного класса // Порошковая металлургия. -2006. -№1/2. –С.26-35.

41. Хоменко Е.В., Баглюк Г.А., Минакова Р.В. Влияние термической и химико-термомеханической обработки на формирование структуры и свойств композиций си-ст электротехнического назначения //international conference “electrical contacts and electrodes”, 23-28 september, 2007. –kiev, 2007. –с.24-25.

УДК. 621.73

В.Л. Калюжний, д-р техн.наук, доц.

НТУ України „Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

ПРОЕКТУВАННЯ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ

В НТУУ «КПІ» розробтан спеціалізований пакет програм для определения параметров холодной объемной штамповки изделий требуемой формы и заданными механическими свойствами деформированного металла путем моделирования на базе метода конечных элементов. Рассчитанные параметры и конечная геометрия изделия не требуют доработки экспериментальными работами. Показаны примеры разработки технологических процессов изготовления изделий различными методами холодной объемной штамповки.

In NTUU «KPI» the specialized software package is developed for definition of parameters of cold forming of articles of the demanded shape and the set mechanical properties of the deformed metal by simulation on the basis of a finite element method. The calculated parameters and final geometry of an article do not demand finishing by experimental operations. Examples of processes design of manufacture of articles are displayed by various methods of cold forming.

Вступ. Ресурсозберігаючі процеси холодного об'ємного штампування (ХОШ) дозволяють отримувати точні вироби з великою продуктивністю, високим коефіцієнтом використання металу і якісною поверхнею. Завдяки зміцненню і підвищенню механічних властивостей здеформованого металу при холодній деформації відкриваються можливості заміни марки матеріалу виробів на більш дешеві без зміни службових характеристик виробів. Однак визначення параметрів в процесах ХОШ в теперішній час в основному зводиться до розрахунків силових режимів деформування і базується на виробничому досвіді та експериментальних даних [1-2]. Використання універсальних комерційних пакетів програм для моделювання процесів ХОШ методом скінчених елементів (МСЕ) з різними підходами до опису поведінки металу при холодній формозміні [3-4] показало, що мають місце розбіжності чисельних результатів з експериментом по зусиллю деформування на кінцевих стадіях видавлювання та розподілу інтенсивності деформації в здеформованому металі. Зроблено висновок, що використання пакетів ANSYS, LS-DINA, FastForm, DinaForm, NASTRAN, COSMOS для моделювання процесів холодного об'ємного штампування необхідні висококваліфіковані фахівці в цій області для аналізу результатів розрахунків

в напрямку визначення оптимальних параметрів технології або визначення взагалі доцільності використання технологічного процесу в цілому або його частини.

Мета та постановка задачі досліджень. На кафедрі МПМ та РП НТУУ «КПІ» створений на базі МСЕ спеціалізований пакет програм (СПП) для проектування процесів ХОШ. СПП дозволяє визначити пружно-пластичний стан металу при холодному деформуванні з вихідного стану заготовки до отримання кінцевої форми виробу з урахуванням великих деформацій та розвантаження після пластичної деформації. За допомогою СПП можливо визначити силові режими, точний розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті, кінцеві розміри виробу та прогнозувати або забезпечувати механічні властивості здеформованого металу. Удосконалення існуючих та розроблення нових технологічних процесів ХОШ з використанням вказаного пакету не потребує доопрацювання їх трудомісткими та затратними експериментальними роботами. Крім того, шляхом моделювання процесів на стадії проектування технологій є можливість визначати параметри, які забезпечують отримання не тільки необхідної форми виробів, а також заданих властивостей здеформованого металу.

Результати досліджень. Наведемо приклади удосконалення існуючих та розробки нових технологій виготовлення методами ХОШ виробів необхідної форми та прогнозованими властивостями здеформованого металу.

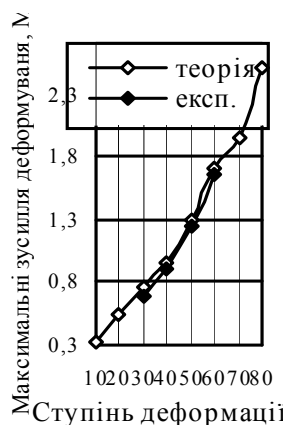


Рис. 1. Залежність максимального зусилля деформування від ступеня деформації

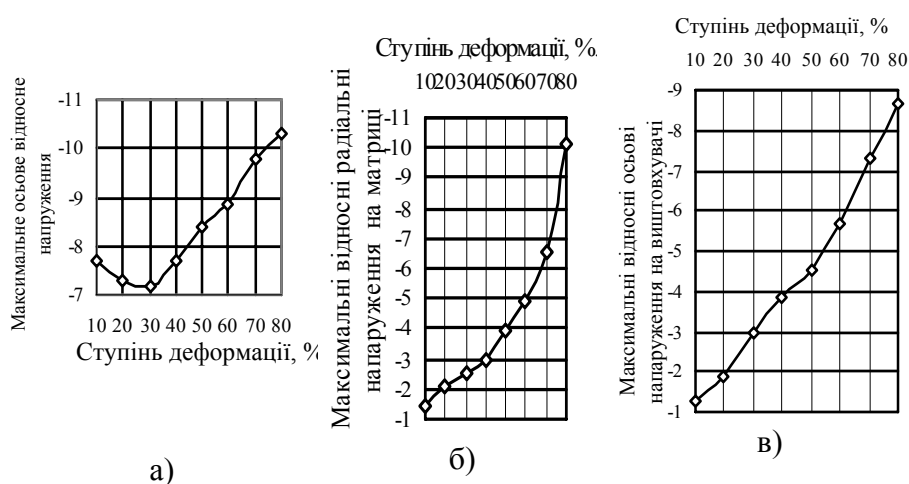


Рис. 2. Розподіл максимальних відносних осьових напружень на пуансоні (а), радіальних напружень матриці (б) і осьових напружень виштовхувачі (в) при видавлюванні з різним ступенем деформації

Процеси холодного видавлювання із сталі порожнистих виробів. В подробицях розрахунковим шляхом досліджено вплив ступеня деформації, геометрії торця пуансона на силові режими деформування, розподіл питомих зусиль на пуансоні, матриці, виштовхувачі, а також визначені показники якості виробів: геометрія виробу з урахуванням розвантаження після деформації, коефіцієнт зміцнення здеформованого металу (відношення інтенсивності напружень до умовної границі течії металу $\sigma_i/\sigma_{0,2}$) та

ступінь використання ресурсу пластичності по об'єму здеформованого металу. Для прикладу наведемо результати, які отримані шляхом моделювання холодного видавлювання порожнистих виробів із сталі 20 конусним пуансоном (кут конусу 166°). На рис. 1 приведені максимальні розрахункові та експериментальні значення зусилля при видавлюванні в залежності від ступеня деформації (ϵ), що достатньо для вибору ковальсько-пресового обладнання. Також встановлені максимальні відносні осьові напруження $\sigma_z/\sigma_{0.2}$ на пуансоні, максимальні відносні радіальні напруження $\sigma_r/\sigma_{0.2}$ на матриці та максимальні $\sigma_z/\sigma_{0.2}$ на виштовхувачі (рис. 2). Максимальні значення наведених напружень необхідні для проектування деформуючого інструменту.

Показники якості виробів показані на рис. 3-4: геометрія стінки виробу з урахуванням розвантаження після деформації при видавлюванні з $\epsilon = 50\%$; теоретичні та експериментальні значення коефіцієнта зміцнення здеформованого металу по середині стінки виробів, які видавлені з різним ступенем деформації. По результатах розрахунків розроблена і впроваджена технологія видавлювання порожнистих виробів із сталі 20 (рис. 5).

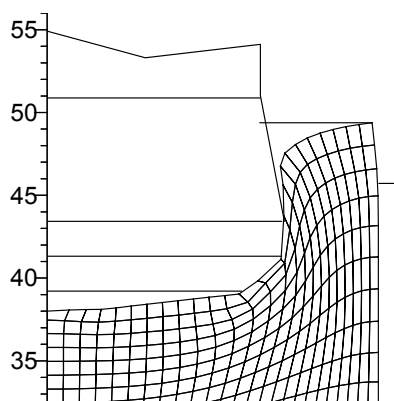


Рис. 3. Геометрія стінки виробу (розміри в міліметрах)

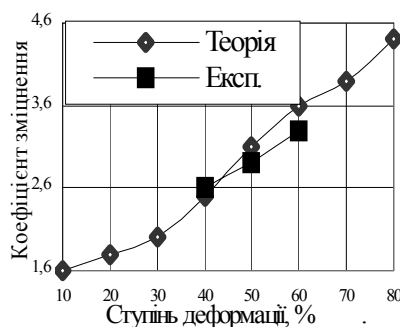


Рис. 4. Коефіцієнт зміцнення по середині стінки виробу

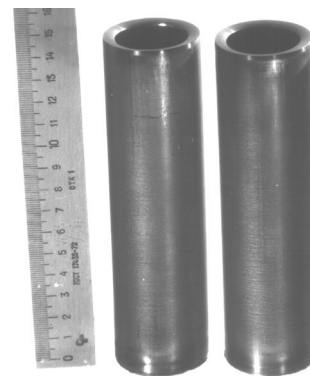


Рис. 5. Виробничі вироби із сталі 20, які видавлені з $\epsilon = 56\%$

Процеси висаджування виробів з прогнозованими механічними властивостями.

Шляхом моделювання вирішена задача отримання методом безвідхідного холодного висаджування виробу кріплення з подовженим стержнем, який використовується в металевих конструкціях. Особливістю даного виробу є умови забезпечення механічних характеристик в області переходу головки в стержень: границя умовної течії $\sigma_{0.2}$ повинна бути не менше 350 МПа. По кресленню виробу був визначений об'єм металу і розраховані розміри вихідної заготовки: діаметр 21,75 мм і висота 270 мм. В результаті моделювання встановлені силовий режим висаджування та питомі зусилля на оснащенні при зміщенні пуансону на 18 мм. На рис. 6 показана залежність зусилля висаджування від переміщення пуансону. По графіку можливо визначити роботу деформації, що важливо для реалізації процесу на кривошипному обладнанні. Розподіл відносних радіальних напружень $\sigma_r/\sigma_{0.2}$ на боковій поверхні головки виробу, яка контактує з матрицею, показаний на рис. 7. Максимальне значення $\sigma_r/\sigma_{0.2} = -9,2$ має місце посередині бокової поверхні головки. З урахуванням $\sigma_{0.2} = 260$ МПа максимальне питоме зусилля на матриці досягає значення 2400 МПа. На рис. 8

наведені розподіли відносних осьових напружень $\sigma_z/\sigma_{0,2}$ на поверхні заготовки, яка контактує з пуансоном. На пуансоні отриманий нерівномірний розподіл $\sigma_z/\sigma_{0,2}$. Максимальне значення вказаних напружень на пуансоні $\sigma_z/\sigma_{0,2} = -10$ (питоме зусилля 2600 МПа). На поверхні заготовки, яка контактує з виштовхувачем, отриманий рівномірний розподіл $\sigma_z/\sigma_{0,2}$, відносні напруження досягають значення $-5,59$ (питоме зусилля 1453 МПа). Наведені значення питомих зусиль забезпечують задовільну стійкість деформуючого інструмента при холодному висаджуванні на кривошипних пресах.

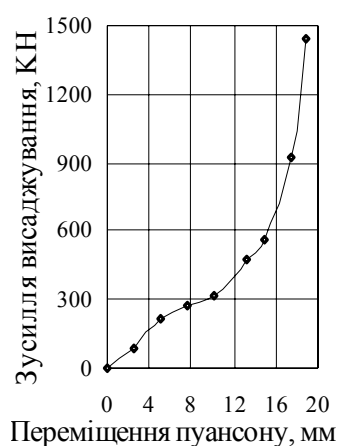


Рис. 6. Залежність зусилля висаджування від переміщення пуансона

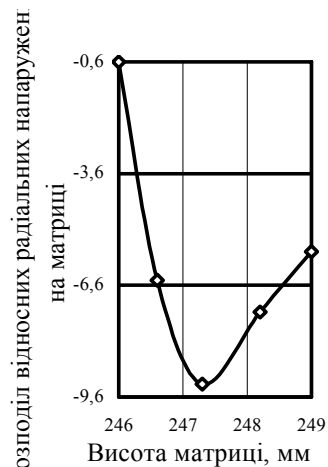


Рис. 7. Розподіл відносних радіальних напружень на матриці

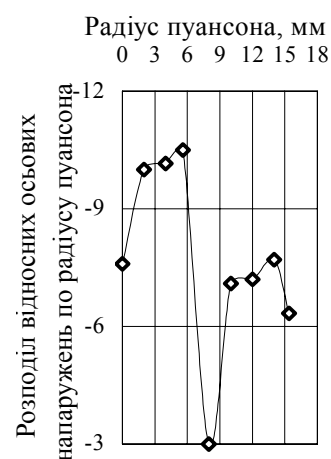


Рис. 8. Розподіл відносних осьових напружень на пуансоні

Прогнозування якості виробу. Сітка скінчених елементів, на які була розподілена вихідна заготовка, після висаджування показана на рис. 9 (в силу симетрії наведена половина заготовки та показана верхня частина її). Здеформований метал в кінці процесу повністю заповнює профіль матриці. Радіуси заокруглення зовнішньої поверхні головки формуються завдяки дії сил тертя між пуансоном і верхнім торцем головки виробу і між матрицею та нижнім торцем головки. Тому немає необхідності в операції „доштампування” для отримання кінцевої геометрії головки. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності ψ zdeформованого металу показаний на рис. 10. З нього видно, що процес висаджування проходить без руйнування. Найбільше значення $\psi = 0,7$ отримав метал в центральній частині головки виробу. Розподіл коефіцієнта зміцнення по об'єму головки показаний на рис. 8. По об'єму головки пропрацювання структури металу пластичною деформацією забезпечило зміцнення zdeформованого металу в 3,7-4,1 рази по відношенню до вихідного стану металу. Межа течії в головці виробу досягла значення по коефіцієнту зміцнення 962 МПа. В області переходу головки в стержень коефіцієнт зміцнення zdeформованого металу досягає значень 1,4 - 1,9, що становить 364 – 464 МПа. Причому, пропрацювання структури металу пластичною деформацією інтенсивно проходить на радіусі заокруглення головки в стержень, що важливо для умов експлуатації виробу. На вісі виробу, в області головки, осередок деформації розповсюджується на всю висоту головки. Таким чином в результаті чисельного експерименту встановлено, що при висаджуванні за один перехід

головки виробу на заготовці із сталі 20 з середнім ступенем деформації $\varepsilon = 0,62$ забезпечується отримання необхідної умови для даного виробу: отримана межа течії $\sigma_{0,2}$ в області переходу головки в стержень більша від необхідної. Розроблена технологія отримання виробів висаджуванням (рис. 12).

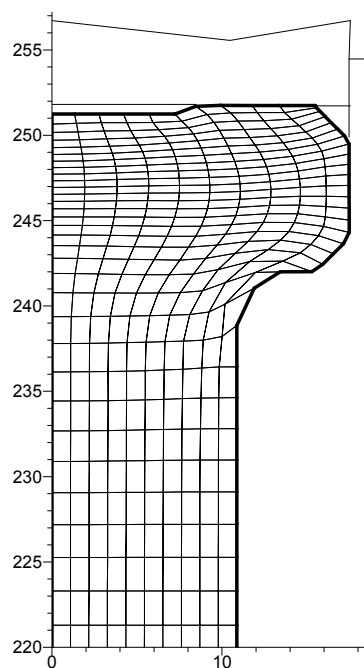


Рис. 9. Сітка скінчених елементів після висаджування (розміри в міліметрах)

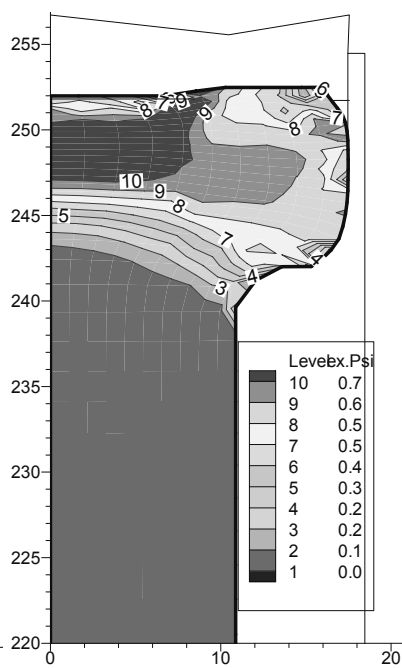


Рис. 10. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності (розміри заготовки в міліметрах)

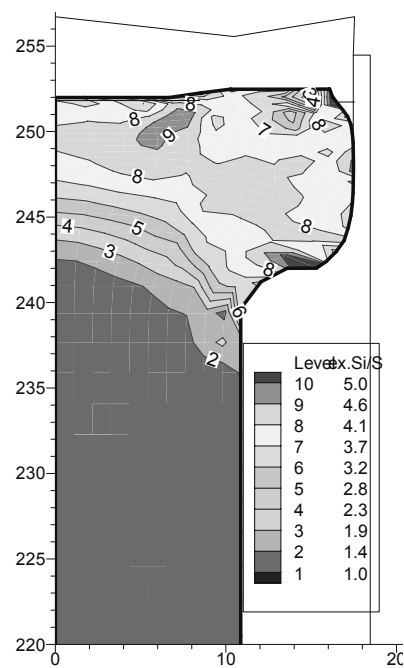


Рис. 11. Розподіл коефіцієнта зміцнення по об'єму виробу (розміри заготовки в міліметрах)

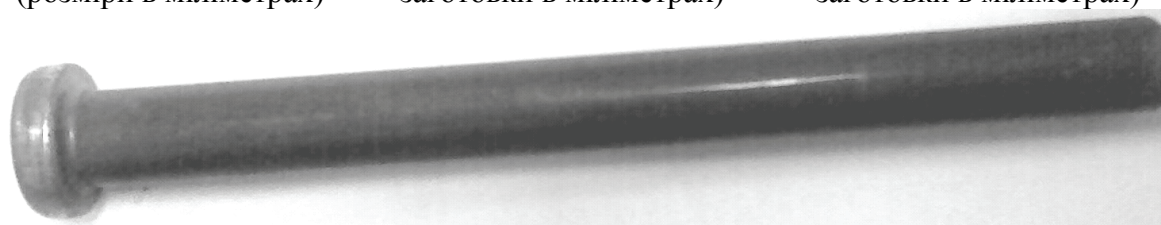


Рис. 12. Виріб кріплення, який отриманий висаджуванням

Далі розглянемо результати моделювання процесу висаджування вісесиметричного виробу кріплення з подвійною головкою та коротким стержнем із сталі 20. Геометрична форма виробу складна, висаджування виконується в роз'ємних матрицях, причому роз'ємна матриця повинна зміщуватися з іншим переміщенням ніж пуансон. Залежність зусилля висаджування від переміщення пуансона та розподіл відносних осевих напружень на поверхні заготовки, яка контактує з пуансоном, показаний на рис. 13. Спочатку зусилля збільшується поступово, а по мірі зменшення висоти заготовки і висоти головок зусилля зростає інтенсивно. На вісі пуансона $\sigma_z/\sigma_{0,2}$ досягають значення -5 (1300 МПа), потім зменшуються до радіуса пуансона 2 мм та знову зростають. В крайній точці дотику пуансона і заготовки отримане максимальне значення $\sigma_z/\sigma_{0,2} = -8$, що складає -2080 МПа. На поверхні заготовки, яка спирається на виштовхувач, отримані розрахункові відносні осеві напруження розподілені практично рівномірно, величина $\sigma_z/\sigma_{0,2} = -5,35$ або -1066 МПа. Прогнозування якості

виробу після висаджування. Половина геометричної форми виробу кріплення, яка отримана моделюванням висаджування показана на рис. 14. Бокові поверхні головок мають заокруглення внаслідок дії сил тертя на контактуючих поверхнях між заготовкою, пуансоном і матрицею при висаджуванні. Ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу (рис. 15) максимально використовується в центральних зонах головок ($\psi=0,5$). Чим ближче до зовнішньої поверхні головок, тим менше вичерпується пластичність zdeформованого металу. Розподіл коефіцієнта зміцнення по об'єму виробу показаний на рис. 16. Практично по всьому об'єму головок проходить пропрацювання структури металу пластичною деформацією, але з невеликим зменшення в напрямку вісі заготовки. В центральних областях головок метал зміцнюється в 2,7 рази по відношенню до вихідного стану. Довкола бокових поверхень головок – в 2,3 рази. В зонах переходу верхньої головки і нижньої головки в стержень коефіцієнт зміцнення досягає значення 1,4. Інші об'єми виробу практично не деформуються. Таким чином, шляхом моделювання доказана можливість отримання висаджуванням виробу кріплення з подвійною головкою.

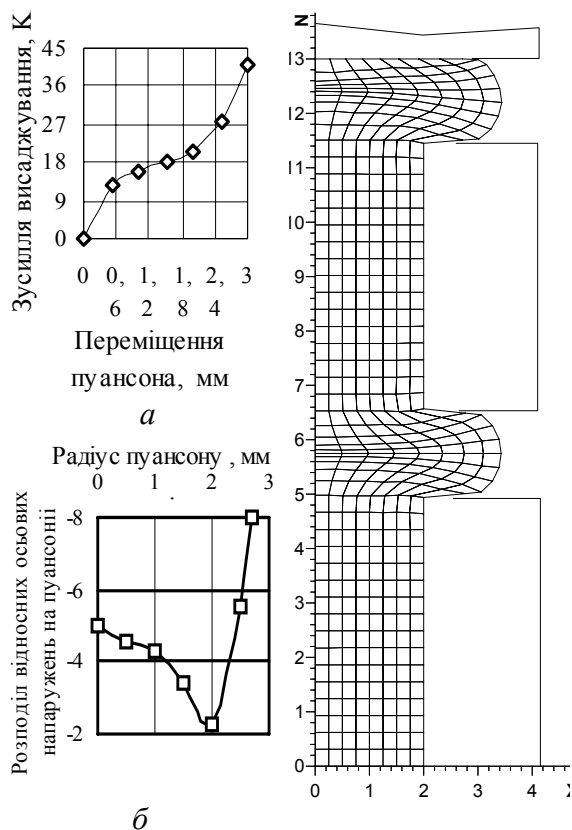


Рис. 13. Залежність зусилля висаджування від переміщення пуансона (а) та розподіл відносних осьових напружень на пуансоні (б)

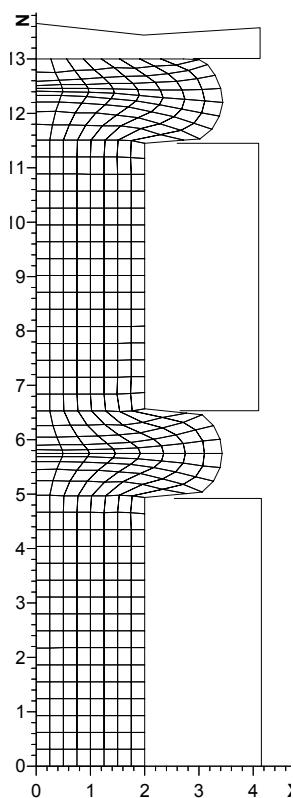


Рис. 14. Геометрія виробу після висаджування (розміри в міліметрах)

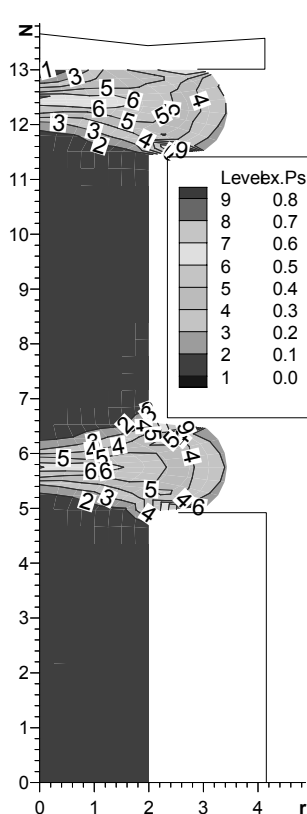


Рис. 15. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності (розміри в міліметрах)

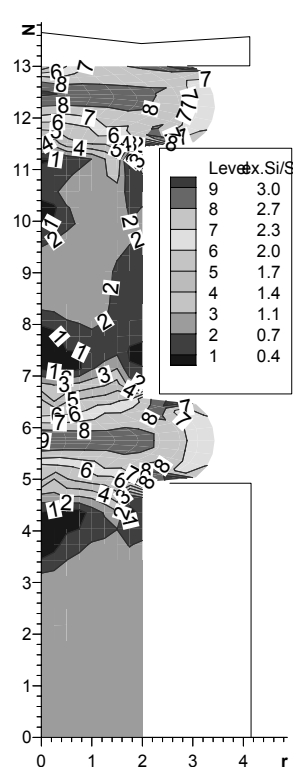


Рис. 16. Розподіл коефіцієнта зміцнення (розміри в міліметрах)

Процеси прямого видавлювання (пресування) круглих вісесиметричних заготовок. Наведемо приклад використання моделювання процесу холодного прямого видавлювання для отримання виробів необхідної форми (кінцевим діаметром 31 мм) з заданим зміцненням здеформованого металу по перетину прутка із сталі 45ХН2МФА-Ш з величиною $\sigma_{0,2} = 400$ МПа в стані постачання. Коефіцієнт зміцнення $\sigma_t/\sigma_{0,2}$ по перетину повинен бути в межах 3,5-4,5.

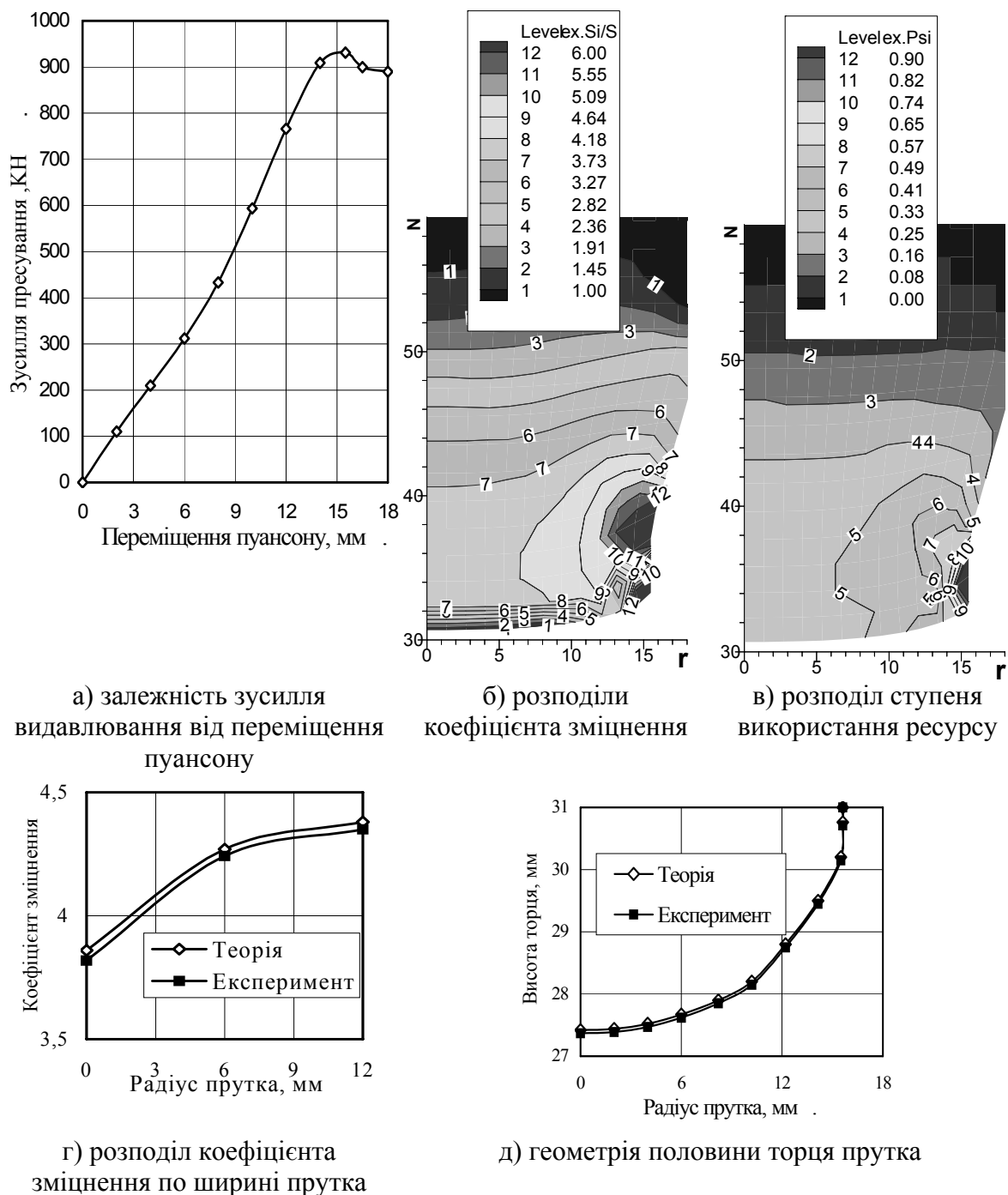


Рис. 17. Результати моделювання та проведених експериментів прямого видавлювання

Проведення моделювання та експериментальних робіт. Для вказаного матеріалу шляхом моделювання визначали ступінь деформації ε та кут конусу матриці 2α для отримання необхідної геометрії та заданих властивостей здеформованого металу. Розрахунковим шляхом встановлено, що $\varepsilon=40,7\%$ та кут матриці $2\alpha=32^\circ$ забезпечують пресуванням в отриманих прутках діаметром 31 мм задане зміцнення по перетину прутка. На рис. 17 приведені результати розрахунків та виконаних експериментальних досліджень. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону на неусталеній стадії та переході в усталену стадію показана на рис. 17а. Максимальне зусилля на переході в усталену стадію склало 930 КН. Розподіл коефіцієнта зміцнення в осередку деформації та в половині прутка на виході з конусу матриці наведений на рис. 17 б. На вісі прутка маємо значення $\sigma_i/\sigma_{0,2}=3,73$, в поверхневих шарах прутка – $\sigma_i/\sigma_{0,2}=4,5-5,0$. Максимальне значення ступеня використання ресурсу пластичності ψ в зовнішніх шарах здеформованого металу прутка досягає 0,7-0,82 (рис. 17 в), що свідчить що холодна формозміна вказаної сталі проходить без руйнування. Проведені експериментальні роботи на гідравлічному пресі ДБ 2432 зусиллям 1,6 МН підтвердили результати розрахунків по зусиллю (експериментальне значення 900 КН) так і по коефіцієнту зміцнення (рис. 17 г) і по геометрії торця прутка (рис. 17 д) та дали можливість розробити і впровадити в виробництво технологію холодного видавлювання виробів із сталі 45ХН2МФА-Ш. На рис. 18 показана вихідна фосфатована заготовка та отримані вироби.



Рис. 19. Схема видавлювання з накладенням диференційованого протитиску

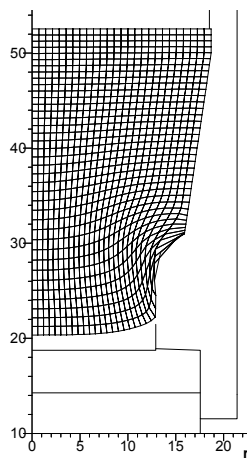


Рис. 20. Половина заготовки штемпеля після моделювання (розміри в міліметрах)



Рис. 21. Заготовки карбувальних штемпелів, які отримані холодним видавлюванням з протитиском

Процеси холодного видавлювання виробів із малопластичних металів. На кафедрі МПМ та РП НТУУ „КПІ” розроблені схеми деформування мало пластичних матеріалів в умовах прикладення диференційованого протитиску на заготовку (рис. 19). Було виконане моделювання такого процесу видавлювання заготовок карбувальних

штемпелів із сталі ШХ15-ШД з умовною межею течії $\sigma_{0,2} = 400$ МПа. Половина заготовки, яка отримана моделюванням наведена на рис. 20. Розрахунком встановлена можливість отримання без руйнування заготовки штемпеля при зусиллі видавлювання 2,8 МН і протитиску 420 МПа. Проведені експериментальні дослідження видавлювання на пресі ПО443 зусиллям 20 МН підтвердили результати моделювання та дозволили розробити нову технологію виготовлення заготовок штемпелів видавлюванням взамін обробки різанням. Вихідні заготовки перед видавлюванням підлягали фосфатуванню з подальшим нанесенням змащення ШС-2. Отримані заготовки холодним видавлюванням показані на рис. 21.

Висновки. 1. На кафедрі МПМ та РП НТУУ „КПІ” розроблений спеціалізований пакет програм на базі МСЕ для удосконалення існуючих та розробки нових процесів виготовлення високоточних деталей необхідної форми з прогнозованими механічними властивостями ресурсозберігаючими процесами холодного об’ємного штампування. Встановлені розрахунковим шляхом технологічні параметри і геометрія виробів не потребують подальшого доопрацювання експериментальними роботами.

2. Моделюванням визначені силові режими, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті, геометрія виробів та властивості здеформованого металу в процесах холодного видавлювання порожнистих виробів із сталі 20.

3. Розрахунковим шляхом визначені технологічні параметри холодного висаджування виробів з однією головкою на подовженому стержні та подвійною головкою на короткому стержні. Вибрані ступені деформації забезпечили необхідні механічні властивості здеформованого металу в місцях переходу головки в стержень.

4. На основі моделювання встановлені ступінь деформації та кут конусу матриці для отримання прямим видавлюванням виробів з необхідними механічними властивостями здеформованого металу по перетину прутка.

5. Розроблені схеми деформування мало пластичних сталей і сплавів в умовах прикладання диференційованого протитиску на заготовку, що деформується. Величина протитиску при холодній формозміні залежить від міри вичерпування пластичності при отриманні виробу. На основі моделювання визначені параметри деформування штампової сталі в холодному стані для отримання заготовок карбувальних штемпелів. Запропонована технологія виготовлення таких деталей холодним видавлюванням взамін обробки різанням.

Список літератури

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др.-Машиностроение, 1987 – т. 3. Холодная объемная штамповка/Под ред. Г.А. Навроцкого. 1987. – 384 с.
2. Теория пластических деформаций металлов/ Е.П. Унков, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е.П. Ункова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
3. Семенов И.Е., Иванов А.В. Математическое моделирование обратного выдавливания коробчатых деталей // Удосконалення процесів та обладнання обробки металів тиском в металургії та машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. - Краматорськ, 2005.-С. 151-156.
4. Гуменюк Ю.И., Иванов К.М., Усманов Д.В. Моделирование процесса выдавливания методом конечных элементов. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Темат. збірник наук. праць. Краматорськ, 2003. – С. 289-294.